

Konzepte für eine Service-basierte Systemarchitektur zur Integration, Prozessierung und Analyse von massiven 3D-Punktwolken

SÖREN DISCHER¹, RICO RICHTER¹ & JÜRGEN DÖLLNER¹

Zusammenfassung: Die Nutzung von hoch aufgelösten, räumlich überlappenden und multitemporalen 3D-Punktwolken im Kontext von Geoinformationssystemen stellt hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der zugrundeliegenden Software- und Hardwaresysteme. Um angesichts eines weiter zunehmenden Datenaufkommens ein effizientes und wirtschaftliches Arbeiten mit solchen Daten zu ermöglichen, entwickeln wir eine service-basierte Software- und Geodateninfrastruktur, die eine Erfassung, Aktualisierung und Bereitstellung von 3D-Punktwolken im Sinne eines kontinuierlichen Prozesses ermöglicht. In diesem Beitrag erläutern wir die grundlegenden Anforderungen und den konzeptionellen Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur, die unter anderem die bedarfsgerechte Bereitstellung ausgewählter Bereiche einer 3D-Punktwolke anhand von semantischen oder temporalen Attributen unterstützt.

1 Einleitung und Problemstellung

Mit LiDAR-Technologie und photogrammetrischen Verfahren können 3D-Punktwolken zunehmend effizient, automatisiert und kostengünstig durch Befliegungen und terrestrische Erfassungen erzeugt werden (LEBERL et al. 2010). Diese Daten bilden die Grundlage für eine Vielzahl von Anwendungen aus unterschiedlichen Bereichen, wie z. B. der Stadtplanung, dem Bauwesen, dem Katastrophenmanagement oder der Umweltüberwachung. Bedingt durch die üblicherweise extrem hohen Datenmengen, beispielsweise im Petabyte-Bereich für eine Metropolregion, stellen die Integration, Prozessierung und Analyse der 3D-Punktwolken hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Software- (z. B. GIS-Anwendungen) und Hardwaresysteme (RICHTER & DÖLLNER 2013). Zukünftig ist eine weitere Zunahme des Datenaufkommens abzusehen, da Erfassungen zum einen eine immer höhere Datendichte aufweisen (z. B. 400 Punkte/m²) und zum anderen in immer kürzeren Zeitabständen durchgeführt werden (z. B. täglich, monatlich). Darüber hinaus werden Technologien zur terrestrischen Erfassung immer stärker eingesetzt. So erfassen und überwachen moderne Fahrerassistenzsysteme die Umgebung von Fahrzeugen mit Hilfe von verschiedenen Sensorsystemen (z. B. Radar, LiDAR, Kameras), aus denen sich georeferenzierte Daten (z. B. 3D-Punktwolken) entlang einer Fahrtstrecke ableiten lassen (LIN et al. 2013). Für die photogrammetrische Generierung von 3D-Punktwolken und 3D-Modellen auf Basis von redundanten Bilddaten existieren frei verfügbare Anwendungen (z. B. Autodesk 123D, Microsoft Photosynth (SNAVELY et al. 2008)) um einer großen Community die einfache und effiziente Digitalisierung realweltlicher Objekte zu ermöglichen. Durch eine Kombination all dieser Datenquellen lassen sich digitale Modelle flächendeckend erzeugen, die in sehr kurzen

1) Hasso-Plattner-Institut, Prof.-Dr.-Helmert-Straße 2-3, 14482 Potsdam;
E-Mail: {soeren.discher, rico.richter, juergen.doellner}@hpi.uni-potsdam.de

Zeitabständen punktuell aktualisiert werden können. Der wesentliche Vorteil im Vergleich zu einer einzelnen Erfassung besteht darin, dass der Datenbestand fortdauernd aktuell gehalten wird und weiterführende Prozesse zielgerichtet, z. B. auf Bereiche in denen sich Daten verändert haben, angewendet werden können.

Die Workflows traditioneller Geoinformationssysteme sind in der Regel nicht für ein effizientes und wirtschaftliches Arbeiten mit *massiven, hoch aufgelösten, räumlich überlappenden und multitemporalen 3D-Punktwolken* ausgelegt. In diesem Beitrag beschreiben wir den Aufbau einer service-basierten Software- und Geodateninfrastruktur (SOA-Infrastruktur) zur Verwaltung massiver 3D-Punktwolken, die ein solches Arbeiten ermöglicht. Wir diskutieren zudem Konzepte und Algorithmen, die die Integration von 3D-Punktwolken in ein einheitliches räumliches Datenmodell, die darin punktuelle Aktualisierung von bestehenden Datenbeständen sowie einen effizienten Zugriff auf die Daten für nachgelagerte Prozesse (z. B. die Validierung von bestehenden Geobasisdaten) ermöglichen.

2 Service-basierte Infrastruktur für 3D-Punktwolken

Traditionelle Workflows von Geoinformationssystemen verwenden 3D-Punktwolken primär zur Ableitung dreiecksbasierter bzw. polygonaler Modelle (z. B. Oberflächenmodelle, Gebäudemodelle, 3D-Stadtmodelle), die in nachfolgenden Prozessen für Analysen sowie zur Visualisierung genutzt werden. Um die aufwendige Erzeugung von 3D-Modellen zu vermeiden und dadurch die Verarbeitungsgeschwindigkeit zu erhöhen, kann man 3D-Punktwolken auch direkt zur Analyse und Visualisierung verwenden (NEBIKER et al. 2010; RICHTER & DÖLLNER 2013). Damit massive 3D-Punktwolken als universelle Geobasisdaten effizient eingesetzt werden können, realisieren wir eine Software- und Geodateninfrastruktur, die sowohl die Erfassung und Aktualisierung als auch die Analyse und Bereitstellung von 3D-Punktwolken im Sinne eines kontinuierlichen Prozesses ermöglicht.

Eine Anforderung an eine solche Infrastruktur ist unter anderem die einfache Integration und Anbindung an bestehende Systeme und Anwendungen durch *standardisierte Schnittstellen*. Angesichts der zu prozessierenden Datenmengen ist eine *dezentrale* Datenhaltung erforderlich. Ein weiterer wesentlicher Faktor für die Etablierung von 3D-Punktwolken als Geobasisdaten ist die Performance der Prozessierung (z. B. Ableitung von 3D-Modellen (ARIKAN et al. 2013)) und der Bereitstellung der Daten. Für die Datenhaltung der Punkte sollte daher eine räumliche Datenstruktur verwendet werden, die eine *effiziente Selektion ausgewählter Bereiche auf Basis von semantischen, räumlichen oder temporalen Attributen* ermöglicht. Berechnungen für 3D-Punktwolken lassen sich in der Regel parallelisieren. Dieser Umstand sollte von der Infrastruktur aufgegriffen und zugunsten der Performance ausgenutzt werden. Für die zu konzipierende Software- und Geodateninfrastruktur ergaben sich somit die folgenden Anforderungen:

- Integration von 3D-Punktwolken aus unterschiedlichen Erfassungssystemen (z. B. flugzeuggestützte, terrestrische oder mobile Laserscans) in ein einheitliches räumliches Datenmodell
- Effiziente Bereitstellung von Daten anhand semantischer, räumlicher und temporaler Attribute

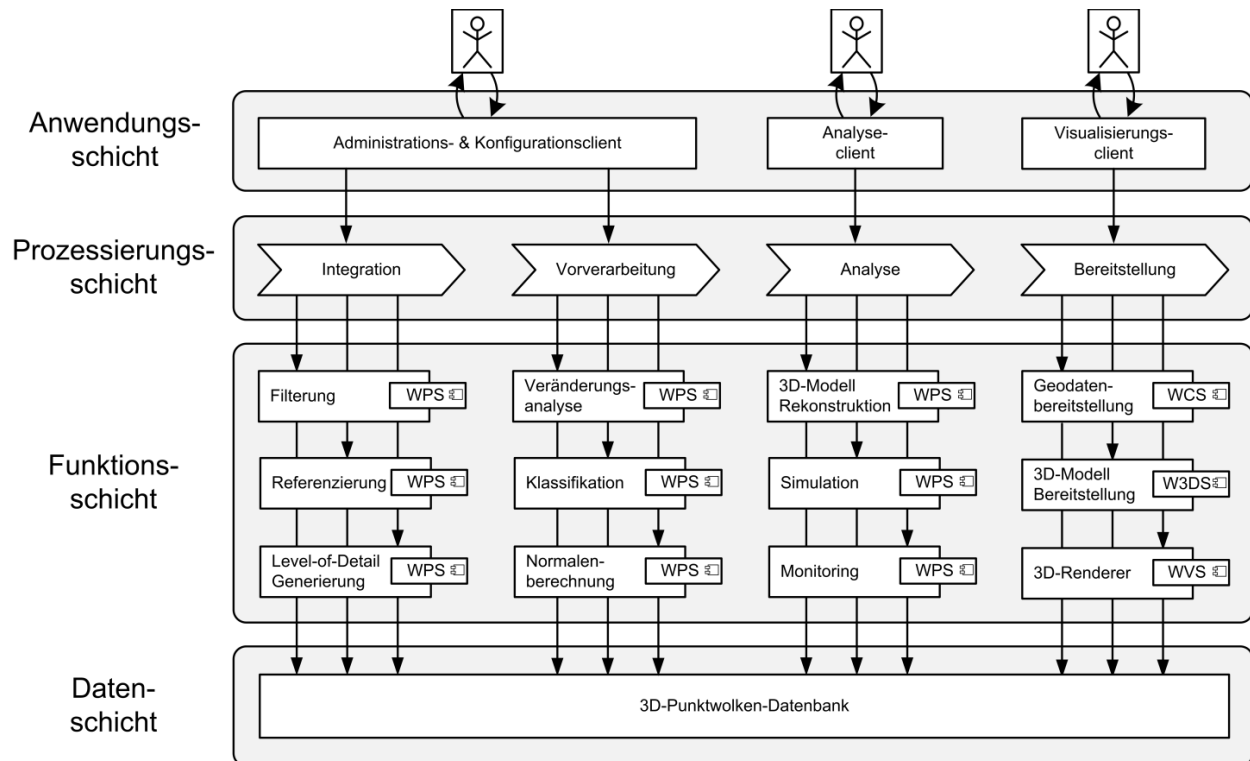


Abb. 1: Grundlegender Aufbau einer service-basierten Systeminfrastruktur, zusammengesetzt aus Web Processing Services (WPS), Web Feature Services (WFS), Web 3D Services (W3DS), und Web View Services (WVS).

- Dezentrale Datenhaltung
- Verteilte, skalierbare, adaptive und punktuelle Aktualisierung, Prozessierung und Analyse
- Integration standardisierter Schnittstellen zur Einbindung *in* externe Komponenten
- Einbeziehung weiterer Geodaten durch Einbindung *von* standardisierten Diensten

Um insbesondere diese Anforderungen in der Praxis zu erfüllen, haben wir eine SOA-Infrastruktur (Abb. 1) konzipiert und implementiert, die verschiedene standardisierte Dienste für die Datenintegration, Datenvorverarbeitung, Datenanalyse und Datenbereitstellung bereitstellt, welche als *Web Processing Services (WPS)* (SCHUT 2007), *Web Coverage Services (WCS)*, *Web 3D Services (W3DS)* oder *Web View Services (WVS)* angeboten werden können. Dadurch lassen sich Komponenten dieser Infrastruktur gezielt in Prozessketten externer bzw. existierender IT-Komponenten (z. B. bestehende GIS-Anwendungen) integrieren. Zudem kann sie ihrerseits durch Nutzung etablierter Geodatendienste weitere Geodaten in die Prozessierung mit einbeziehen. Die bereitgestellten Dienste lassen sich den folgenden Kategorien zuordnen:

- **Datenintegration.** Dienste dieser Kategorie ermöglichen die Verwaltung und Aktualisierung des Datenmodells. Die Integration weiterer Daten in das Datenmodell erfordert dabei deren Bereinigung und Überführung in ein einheitliches Georeferenzsystem.

- **Datenvorverarbeitung.** Unter dem Begriff *Datenvorverarbeitung* werden verschiedene Prozessierungsfunktionen zusammengefasst, welche grundlegende punktbasierte Attribute ermitteln (z. B. topologische Eigenschaften, Farbwerte, Objektklassen). Diese Attribute bilden häufig die Grundlage für nachfolgende Analysen oder Visualisierungen.
- **Datenanalyse.** Zu dieser Kategorie zählen verschiedene komplexe Analysefunktionen, wie die Ableitung, Aktualisierung und Validierung von 3D-Modellen oder Flut- und Lärmsimulationen auf Basis von 3D-Punktwolken. Üblicherweise nutzen sie zusätzliche Informationen, die sich im Rahmen der Vorverarbeitung oder durch Integration externer Geodaten ermitteln lassen.
- **Datenbereitstellung.** Die Bereitstellung und der Zugriff auf die Daten durch externe Komponenten kann über verschiedene Geodatendienste erfolgen, die neben der Übertragung der Geodaten (WCS) auch die Übermittlung von Bilddaten zur direkten Visualisierung der Daten auf Clientseite (W3DS, WVS) ermöglichen.

2.1 Datenintegration

Die Integration heterogener 3D-Punktwolken unterschiedlichster Formate und Herkunftsarten in ein einheitliches Datenmodell, das zugleich einen effizienten Zugriff auf die enthaltenen Daten ermöglicht, ist essentiell für die Funktionalität der vorgestellten Infrastruktur. Um eine Nutzbarkeit in möglichst vielen Bereichen zu gewährleisten, ist die Unterstützung standardisierter Formate (z. B. LAS, GML, PLY, XYZ), insbesondere solcher, die der INSPIRE-Initiative, bzw. den OGC-Standards entsprechen, erforderlich.

Eine wesentliche Verwendung des Datenmodells basiert auf der Datenselektion anhand räumlicher Attribute. Zur Organisation der Daten sind daher räumliche Datenstrukturen (z. B. Quadtree, Octree, Kd-Tree) erforderlich, die für einen solchen Verwendungszweck optimiert sind (RICHTER & DÖLLNER 2013). Spezialisierte räumliche Datenstrukturen, sogenannte Level-of-Detail-Datenstrukturen halten für jeden Bereich eine Auswahl von Punkten vor, um je nach Anwendungsfall unterschiedlich hoch aufgelöste Daten bereitstellen zu können (GOSWAMI et al. 2013). Da die volle Auflösung der Daten für viele Anwendungsfälle nicht benötigt wird, kann die Effizienz der Datenselektion durch die Nutzung derartiger Verfahren weiter erhöht werden.

Die verwendete räumliche Datenstruktur muss darüber hinaus auch die Integration von neuen Daten und die Aktualisierung von bestehenden Daten effizient unterstützen. Diese Eigenschaft ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn 3D-Punktwolken aus kontinuierlichen Erfassungen in das Datenmodell integriert werden. Kd-Trees sind daher grundsätzlich ungeeignet, da diese für statische Datenmengen ausgelegt sind und die Integration weiterer Daten häufig eine Neuberechnung der räumlichen Datenstruktur erfordert. Die Wahl zwischen Octree und Quadtree sollte dagegen in Abhängigkeit vom primären Anwendungsszenario getroffen werden: So eignen sich Octrees in erster Linie zur Verwaltung von terrestrisch erfassten Daten, da die Punkte relativ gleichmäßig im 3D-Raum verteilt sind. Bei flugzeuggestützten Laserscans ist die horizontale Verteilung der Punkte, im Vergleich zur vertikalen Verteilung, wesentlich größer. Somit sind große Bereiche des 3D-Raums unbesetzt, was einen unbalancierten Octree zur Folge hat. Bei einer vorrangig zweidimensionalen Punktverteilung sind Quadrees daher besser geeignet. Mitunter ist auch eine Kombination verschiedener räumlicher Datenstrukturen sinnvoll,

etwa dann, wenn sich die Datenmenge aus terrestrischen und flugzeuggestützten oder aus einmaligen und kontinuierlichen Erfassungen zusammensetzt.

Bei einer service-basierten Architektur werden die Daten in einer serverseitigen Datenbank organisiert. Im Unterschied zu einer Desktop-Lösung können die Daten hierbei dezentral gehalten werden. Dies ermöglicht neben der Verwaltung beliebig großer Datenmengen auch eine redundante Datensicherung, wodurch die Stabilität der Infrastruktur gegenüber Hardwareausfällen verbessert wird.

2.2 Datenvorverarbeitung und Datenanalyse

Datenanalyse-Komponenten und -Funktionen erfordern in der Regel, zusätzlich zur räumlichen Lage, weitere Eigenschaften pro Punkt, die diesen charakterisieren. Beispiele hierfür sind Farbe, Oberflächennormalen, Veränderungsinformationen und die Zugehörigkeit zu Objektklassen (z. B. Bebauung, Vegetation, Gelände, Gewässer). Diese Informationen werden entweder aus zusätzlichen Geodaten abgeleitet, die durch Verwendung externer Geodatendienste eingebunden werden können, oder während der Datenvorverarbeitung durch eine Analyse, beispielsweise basierend auf der lokalen Umgebung eines Punktes, ermittelt.

Für das vorgestellte Konzept relevante Dienste für eine Datenvorverarbeitung sind die *Veränderungsanalyse* und die *Klassifikation* von 3D-Punktwolken. Die Veränderungsanalyse gleicht neue Daten mit bestehenden ab, um Bereiche mit Veränderungen (z. B. Neubauten) zu identifizieren (RICHTER et al. 2012). Sie ist somit eine Grundvoraussetzung für die punktuelle Aktualisierung des bestehenden Datenbestands. Die *Klassifikation* von 3D-Punktwolken wird eingesetzt, um Punkte mit semantischen Informationen anzureichern. Basierend auf einer Analyse der Umgebung eines Punktes (z. B. Normalenstreuung, Oberflächenstruktur, Reflexionseigenschaften) wird diesem eine Objektklasse zugeordnet (CARLBERG et al. 2009; RICHTER et al. 2013). Im Sinne eines kontinuierlichen Datenintegrationsprozesses muss die Vorverarbeitung stets nur punktuell für Bereiche mit Veränderungen durchgeführt werden. Der Berechnungsaufwand bei der Integration neuer Daten in das Datenmodell wird somit signifikant reduziert.

Die Vorverarbeitung bildet die Grundlage für die effiziente Durchführung weiterführender Analysen (z. B. der Validierung bestehender 3D-Stadtmodelle). Im Gegensatz zu den Vorverarbeitungsfunktionen handelt es sich bei den Ergebnissen der Analysefunktionen nicht zwangsläufig um Zusatzdaten für die im System vorgehaltenen 3D-Punktwolken, sondern je nach Anwendungsfall um andere Geodaten (z. B. 3D-Modelle, Gebäudeumringe, Karten). Gängige Analysefunktionen können mit der vorgestellten Systeminfrastruktur effizient durchgeführt werden. Zum einen ist es möglich, lediglich auf eine Teilmenge des Datenbestandes, beispielsweise den Daten eines bestimmten Zeitraums oder einer Objektkategorie (z. B. nur Vegetationspunkte), zuzugreifen. Zum anderen kann auf notwendige Information (z. B. Distanzwerte, Objektkategorien, topologische Attribute) zurückgegriffen werden, die bereits im Rahmen der Vorverarbeitung ermittelt wurden.

Die vorgestellte SOA-Infrastruktur ermöglicht es darüber hinaus, sowohl die Analyse als auch die Vorverarbeitung verteilt und parallel durchzuführen. Hierdurch wird zum einen der Durchsatz der Infrastruktur deutlich erhöht und zum anderen sichergestellt, dass sie – entsprechende serverseitige Hardware vorausgesetzt – für beliebig große Datenmengen skaliert.

Durch Verwendung etablierter Schnittstellen können die von der Infrastruktur bereitgestellten Dienste zudem leicht in bestehende Prozessketten integriert werden.

2.3 Datenbereitstellung

3D-Punktwolken werden von unterschiedlichsten Anwendungen und Workflows verwendet, beispielsweise als Grundlage für die Ableitung von 3D-Modellen, zur Durchführung von Analysen oder zur direkten Visualisierung. Um die Nutzung der Infrastruktur und deren nahtlose Integration in bestehende Systeme zu gewährleisten, müssen daher verschiedene Schnittstellen und Dienste angeboten werden, die sowohl den Export der vorgehaltenen Daten (zur Prozessierung) als auch die Bereitstellung von Bilddaten (zur Visualisierung) ermöglichen.

Im Kontext von GIS-Anwendungen werden in der Regel ausgewählte Teile und Attribute der Daten zur weiteren Analyse benötigt. Die angebotenen Schnittstellen sollten daher die Auswahl von Punkten auf Basis von topologischen, semantischen und temporalen Attributen durch die Spezifikation der gewünschten Datencharakteristik ermöglichen. Da die Anwendungen häufig nur eine bestimmte Datendichte erfordern, beziehungsweise verarbeiten können, sollte auch die Anforderung von unterschiedlichen Detailstufen als Teil der Parametrisierung unterstützt werden. Zur Umsetzung einer solchen Funktionalität empfiehlt sich im Rahmen einer service-basierten Infrastruktur die Verwendung eines entsprechend angepassten *Web Coverage Services* (WCS) (BAUMANN 2012). Um die Interoperabilität mit bestehenden Diensten sicherzustellen muss die Übertragung der Daten auf Grundlage vom OGC standardisierter Protokolle (z. B. JPIP) und Datenformate (z. B. GMLJP2) erfolgen, die für die Datenübertragung in Netzwerken ausgelegt sind (SHAO et al. 2013).

Werden die Daten dagegen ausschließlich für eine Visualisierung benötigt, ist die Nutzung eines service-basierten Visualisierungsansatzes sinnvoll. Die Daten werden dabei in einer für das Rendering auf dem Client optimierten Form zur Verfügung gestellt. Bei einem *Web 3D Service* (W3DS) (SCHILLING & KOLBE 2010) werden die zu visualisierenden Daten entsprechend der Anfrage selektiert, konfiguriert (z. B. Anpassung von Farbe, Größe, Primitivtyp der Punkte) und an den Client übertragen. Die echtzeitfähige Visualisierung von massiven 3D-Punktwolken ist mit diesem Ansatz in der Regel nicht möglich, da hierzu enorme Datenmengen übertragen werden müssten. Da das Rendering der Daten auf Clientseite erfolgt, muss dieser zudem bestimmte Hardwarevoraussetzungen erfüllen, um die Daten mit der geforderten Performanz darstellen zu können. Üblicherweise sind die Anforderungen bei einem solchen *Medium-Client*-Ansatz relativ hoch, sodass mobile Endgeräte (z. B. Smartphones, Tablets) dafür nicht geeignet sind.

Alternativ kann ein sogenannter *Thin-Client*-Ansatz unter Verwendung von *Web View Services* (WVS) (HAGEDORN 2010) umgesetzt werden. Hierbei wird das Rendering vom Client auf den Server verlagert, sodass ausschließlich Bilddaten übertragen werden müssen. Dadurch werden die Anforderungen an die Übertragungskapazität des mobilen Netzes und die 3D-Hardware des Endgeräts im Falle massiver Daten stark reduziert, sodass eine Visualisierung auch auf mobilen Endgeräten ermöglicht wird. Um kontinuierliche Bilddaten zu übertragen und eine interaktive Visualisierung komplexer 3D-Szenen bereitzustellen, ist bei der Verwendung eines WVS, unabhängig von der Hardware des Endgeräts, eine ausreichende Netzwerkbandbreite

erforderlich. Das zu übertragende Datenaufkommen ist vor allem bei der Visualisierung von massiven Daten wesentlich geringer als bei Verwendung eines W3DS (DÖLLNER et al. 2012). Die Stärke einer service-basierten Architektur bezogen auf die Datenbereitstellung liegt analog zur Datenvorverarbeitung und Datenanalyse darin, dass verschiedene Anfragen parallel und verteilt prozessiert werden können. Die Leistungsfähigkeit der gesamten Infrastruktur wird dabei nur durch die serverseitig vorhandenen Hardwareressourcen beschränkt, die jedoch im Bedarfsfall erweitert werden können.

3 Anwendungen und Evaluation

Die Evaluation der vorgestellten service-basierten Systeminfrastruktur erfolgte anhand von zwei praxisrelevanten Anwendungsfällen: Der Aktualisierung eines bestehenden virtuellen 3D-Stadtmodells sowie der Überwachung von Baumbeständen in einer Metropolregion anhand von massiven 3D-Punktwolken. Die einzelnen Schritte sind in Abbildung 2 dargestellt und in den Gesamtkontext der Infrastruktur eingeordnet.

Die Datengrundlage für beide Anwendungsfälle sind zwei 3D-Punktwolken eines Stadtgebietes aus unterschiedlichen Jahren. Die ältere 3D-Punktwolke hat eine Punktdichte von 7-10 Punkten/m², ca. 5 Milliarden Punkte und einen Speicherbedarf von 75 Gigabyte; die aktuellere 3D-Punktwolke hat eine Punktdichte von 100 Punkten/m², 80 Milliarden Punkte und einem Speicherbedarf von 1200 Gigabyte.

Die Aktualisierung des virtuellen 3D-Stadtmodells erforderte im Rahmen der Vorverarbeitung sowohl eine Veränderungsanalyse, als auch eine Klassifizierung der Daten. Das Ergebnis der Veränderungsanalyse sind dabei punktspezifische Attribute, die den Grad der Veränderung

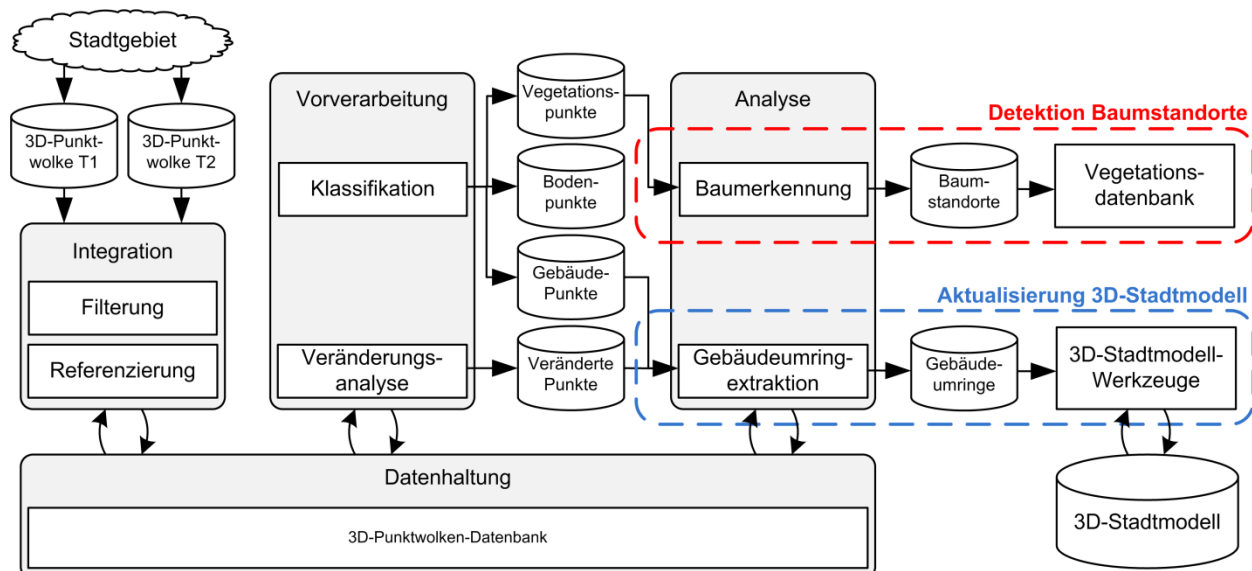


Abb. 2: Ablauf der Prozessierung von zwei 3D-Punktwolken aus unterschiedlichen Befliegungen (T1 und T2) im Kontext der service-basierten Systeminfrastruktur für die Anwendungsfälle Detektion von Baumstandorten und Aktualisierung eines 3D-Stadtmodells.

gegenüber einer früheren Erfassung angeben. Bei der Klassifikation der Daten wurde in diesem Szenario zwischen den Objektklassen Bebauung, Gelände, Vegetation und Gewässer unterschieden. Auf Basis dieser vorberechneten Attribute wurden alle Gebäudepunkte, die ein bestimmtes Maß an Veränderung (z. B. größer 2 Meter) aufweisen, ermittelt und zur Ableitung von Gebäudeumringen verwendet. Diese Umringe beschreiben alle neuen und baulich veränderten Gebäude und wurden für die Aktualisierung des 3D-Stadtmodells verwendet. Die Rekonstruktion der Gebäude konnte zielgerichtet und effizient von 3D-Stadtmodellwerkzeugen durchgeführt werden, da diese nur auf einem Bruchteil des gesamten Datenbestandes (ca. 2 Prozent) arbeiten mussten. Im zweiten Anwendungsfall wurden die bereits klassifizierten Daten in der 3D-Punktwolken-Datenbank für die Bestimmung von Baumstandorten verwendet. Das Analyseverfahren griff ausschließlich auf Vegetationspunkte zurück, um einzelne Bäume mit zugehörigen Attributen (z. B. Höhe, Volumen) zu identifizieren. Die Ergebnisse wurden für die Evaluation eines Straßenbaumkatasters mit über 10.000 Baumstandorten verwendet, um die Unterschiede zwischen den vorhandenen Daten und dem tatsächlichen Baumbestand zu ermitteln.

Die Vorverarbeitung wurde auf mehreren Testsystemen parallel durchgeführt. Jedes Testsystem verfügte über eine Intel Xeon CPU mit 2.66 GHz, 12 Gigabyte Hauptspeicher und eine NVIDIA GeForce GTX 660 Grafikkarte. Der Datendurchsatz für die Prozessierung betrug bei der Klassifizierung ca. 0.33 Milliarden und bei der Veränderungsanalyse ca. 5 Milliarden Punkte pro Stunde. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit bei der Integration, Speicherung und Bereitstellung der Daten hängt von der verfügbaren Netzwerk- und Speicheranbindung ab und lag bei unserem System bei ca. 80 Megabyte pro Sekunde.



Abb. 3: 3D-Punktwolke einer Befliegung dargestellt mit Luftbildfarben (links) und auf Basis des Klassifizierungsergebnisses (rechts).

Die Stärken einer service-basierten Architektur zeigten sich hierbei in der Möglichkeit, die Daten in der 3D-Punktwolken-Datenbank dezentral zu organisieren und eine parallele und verteilte Prozessierung durchzuführen. Dies ermöglichte es, die einzelnen Phasen der Prozessierung (Integration, Vorverarbeitung, Analyse) bedarfsgerecht und punktuell für ausgewählte Bereiche durchzuführen und somit die Leistungsfähigkeit insgesamt zu erhöhen. Darüber hinaus können der Datenbestand sowie die Ergebnisse der Analysen jederzeit mit einem service-basierten Client visualisiert und auf ihre Korrektheit überprüft werden. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt der vorgestellten Eingabedaten, dargestellt mit Farbinformationen aus Luftbildern (links) sowie dazugehörige Klassifizierungsergebnisse der Vorverarbeitung (rechts).

4 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Gesamtkonzept für eine service-basierte Software- und Geodateninfrastruktur zur Integration, Prozessierung und Analyse von 3D-Punktwolken vorgestellt. Die beschriebene Infrastruktur ermöglicht dabei die Verwaltung von hoch aufgelösten, räumlich überlappenden sowie multitemporalen 3D-Punktwolken. So werden 3D-Punktwolken, die von heterogenen Erfassungssystemen stammen, in ein einheitliches räumliches Datenmodell überführt, welches eine punktuelle Aktualisierung und Analyse sowie einen effizienten und selektiven Zugriff auf Teile der verwalteten Daten anhand von räumlichen, semantischen oder temporalen Attributen ermöglicht. Die Datenhaltung wird dabei dezentral organisiert; die Prozessierung und Analyse kann skalierbar und adaptiv durchgeführt werden. Die Kommunikation mit externen Anwendungen und Prozessen erfolgt über etablierte Standards (z. B. WPS, WCS, W3DS, WVS), sodass sich die Infrastruktur leicht in Prozessketten bestehender Systeme und GIS-Anwendungen integrieren lässt. Die beschriebenen Konzepte erleichtern erheblich die Etablierung und Bereitstellung von 3D-Punktwolken als universelle Geobasisdaten und ermöglichen deren Verwendung in unterschiedlichsten Anwendungsdomänen.

Die grundlegende Praxistauglichkeit der vorgestellten und prototypisch umgesetzten Systemarchitektur wurde durch unterschiedliche Anwendungsfälle nachgewiesen. Zukünftig wollen wir 3D-Punktwolken aus Befliegungen, terrestrischen und mobilen Erfassungen in unser System integrieren, sodass neue Analysenansätze verfolgt werden können. Eine grundsätzliche Herausforderung bleibt die effiziente Datenübertragung von 3D-Punktwolken mittels standardisierter Protokolle und Formate.

5 Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und ist Teil der InnoProfile Transfer Nachwuchsforschergruppe "4DnD-Vis" und der Research School für "Service-Oriented Systems Engineering" am Hasso-Plattner-Institut. Die verwendeten Daten wurden von Fa. virtualcitySYSTEMS sowie der Berlin Partner für Wirtschaft und Technologie GmbH bereitgestellt.

6 Literaturverzeichnis

- ARIKAN, M., SCHWÄRZLER, M., FLÖRY, S., WIMMER, M., & MAIERHOFER, S., 2013: O-snap: Optimization-based snapping for modeling architecture. *ACM Transactions on Graphics*, 32(1), S. 6:1-6:15
- BAUMANN, P., 2012: Web Coverage Service (WCS) Interface Standard, Version 2.0.1, Open Open Geospatial Consortium Inc.
- CARLBERG, M., GAO, P., CHEN, G., ZAKHOR, A., 2009: Classifying Urban Landscape in Aerial Lidar using 3d Shape Analysis. *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, S. 1681–1684
- DÖLLNER, J., HAGEDORN, B., KLIMKE, J., 2012: Server-based rendering of large 3D scenes for mobile devices using G-buffer cube maps. *Proceedings of the 17th International Conference on 3D Web Technology*, S. 97–100.
- GOSWAMI, P., EROL, F., MUKHI, R., PAJAROLA, R., & GOBBETTI, E. , 2013: An efficient multi-resolution framework for high quality interactive rendering of massive point clouds using multi-way kd-trees. *The Visual Computer*, 29(1), S. 69-83.
- HAGEDORN, B., 2010: Web View Service Discussion Paper, Version 0.3.0, Open Geospatial Consortium Inc.
- LEBERL, F., IRSCHARA, A., POCK, T., MEIXNER, P., GRUBER, M., SCHOLZ, S., WIECHERT, A., 2010: Point Clouds: Lidar versus 3D Vision. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76(10), S. 1123–1134
- LIN, H., JIZHOU, G., ZHOU, Y., LU, G., YE, M., ZHANG, C., LIU, L., YANG, R., 2013: Semantic Decomposition and Reconstruction of Residential Scenes from LiDAR data. *ACM Transactions on Graphics*, 32(4), S. 66:1-66:10
- NEBIKER, S., BLEISCH, S., CHRISTEN, M., 2010: Rich point clouds in virtual globes – A new paradigm in city modeling? *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(6), S. 508–517
- RICHTER, R., KYPRIANIDIS, J.E., DÖLLNER, J., 2012: Out-of-Core GPU-based Change Detection in Massive 3D Point Clouds. *Transactions in GIS*, 17(5), S. 724-741
- RICHTER, R., DÖLLNER, J., 2013: Concepts and techniques for integration, analysis and visualization of massive 3D point clouds. *Computers, Environment and Urban Systems*, in press
- RICHTER, R., BEHRENS, M., DÖLLNER, J., 2013: Object class segmentation of massive 3D point clouds of urban areas using point cloud topology. *International Journal of Remote Sensing*, 34(23), S. 8394-8410
- SCHILLING, A., KOLBE, T.H., 2010: Draft for Candidate OpenGIS Web 3D Service Interface Standard, Version 0.4.0, Open Open Geospatial Consortium Inc.
- SCHUT, P., 2007: OpenGIS Web Processing Service, Version 1.0.0 Open Geospatial Consortium Inc.
- SHAO, Y., LIPING, D., KANG, L., & HAN, W., 2013: Using Open Standards to Integrate LIDAR and Geoprocessing. *LiDAR Magazine* 10/2013, 3(5), S. 66-69
- SNAVELY, N., GARG, R., SEITZ, S.M., & SZELISKI, R., 2008: Finding paths through the world's photos. *ACM Transactions on Graphics*, 27(3), S. 11-21